太阳能辅助燃煤电厂碳减排的技术经济性比较

赵睿恺　赵 力　邓 帅

（中低温热能高效利用教育部重点实验室，天津大学，天津 300072）

摘　要：本文基于 300MW 燃煤电厂的设计参数，针对四种典型燃煤电厂碳减排系统进行了发电量和碳减排量的比较。同时，从经济性角度分析且比较了四种燃煤电厂碳减排系统的均化发电成本(LCOE)和碳移除成本(COR)。结果显示在碳捕集率为 50%条件下，当碳捕集设备的价格降低到原价的 70%且有机朗肯循环(ORC)设备价格低于 5065 元/kW 时，太阳能 ORC 辅助碳减排的发电成本比太阳能直接辅助碳捕集系统低，此时太阳能 ORC 辅助系统在经济性上具备竞争力。

关键词：碳减排；太阳能；燃煤电厂；技术经济性分析

中图分类号：TK519　　**文献标志码：**A

Techno-economic Comparison of Solar-assisted Power Plant for Emission Reduction

Zhao Rui—Kai　Zhao Li　Deng Shuai

(*Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: Based on design parameters of a 300 MW power plant, the performances of four systems equipped by emission reduction unit are compared for power generation and emission reduction. Economic evaluation was conducted in terms of levelized costs of electricity (LCOE) and cost of CO_2 removed (COR). Results show that when the price of Organic Rankine Cycle (ORC) is lower than 5065 CNY/kW and the price of Amine plant is reduced to the 70% of initial cost, the solar ORC assisted system has advantages over the solar direct assisted system at the capture rate of 50%.

Keywords: carbon emission reduction; solar energy; coal-fired power plant; techno-economic feasibility

0 引言

目前，适合燃煤电厂碳捕获的主流技术多为能源密集型技术，即捕集能耗过高，例如燃烧后碳捕集技术中 MEA 吸收法，解吸塔内解吸反应过程需大量的热量，捕获每吨 CO_2 需要 3~4 GJ 热能。燃煤电厂供给如此大量热量通常采用汽轮机低压抽汽，从而导致燃煤电厂输出功率的损失[1]。作为一种清洁能源，太阳能的应用越来越受到重视。从减少燃煤电厂碳捕集功率损失的角度，一些学者研究通过太阳能热利用技术进行辅助，减少了汽轮机抽汽供热。例如，文献[2,3]均围绕太阳能直接供热给再沸器展开可行性研究，并对其进行技术性和经济性分析。文献[4]提出太阳能有机朗肯循环（ORC）辅助电厂碳捕集系统，利用冷凝过程提供再沸器耗热，实现了太阳能循环的梯级利用。作为间接减排方式，提高能源转化效率和新能源集成使用也可以为燃煤电厂碳减排提供技术方案。文献[5]利用 TRNSYS 模拟分析了一座 300MW 的太阳能辅助电厂的性能。其中利用太阳能加热蒸汽代替电厂朗肯循环抽汽加热回热器，提高了燃煤电厂的输出功率，具有间接减排效应。

综合以上发现：众多学者提出不同的太阳能辅助燃煤电厂碳减排系统，并各自进行了分析，然而在相同基础上对比分析不同太阳能辅助方式的文献却很少。本文在 300 MW 燃煤电厂的基础上，选取四个典型系统，从系统发电量和碳减排量的角度，进行了技术性分析与比较；同时，从经济性角度，比较了四类系统的均化发电成本和碳移除成本。

1 系统介绍

本文选取四种燃煤电厂碳减排方式，其系统结构如图 1 所示。

系统 1：常规电厂汽轮机抽汽式碳捕集系统，图中以虚线 A 将电厂循环和碳捕集系统相连，从而对该系统进行图示。其工作原理为：通过汽轮机低压抽汽的方式为再沸器提供热量，用以捕捉电厂烟气中的 CO_2。吸收剂选用 MEA 溶液，再沸器负荷为 3.12 GJ/ton，再沸器温度为 120 ℃[1]。

基金项目：国家科技部 863 项目（2012AA051103）；天津市应用基础与前沿技术研究计划项目：2015 年青年基金项目

作者简介：赵睿恺

系统 2：太阳能辅助电厂发电系统，图中以虚线 B 将电厂循环和太阳能集热场相连。其工作原理为：利用太阳能加热蒸汽代替电厂朗肯循环抽汽加热回热器，提高电厂的发电量。受回热器设计条件的限制，来自太阳能制取的蒸汽量是需参考电厂既有抽汽回热设计容量的，故太阳能集热器面积也需符合该设定容量，其面积为 0.12 km^2[5]。

系统 3：太阳能辅助电厂碳捕集系统，图中虚线 A 与 C 将电厂循环、碳捕集系统和太阳能集热场相连。其工作原理为：利用太阳能集热场环路产生的蒸汽或汽轮机抽汽的方式为再沸器提供热量，实现 CO_2 的捕捉[2, 3]。太阳能集热环路集热温度设定为 180 ℃，产生蒸汽的温度 144 ℃。

系统 4：太阳能 ORC 辅助电厂碳捕集系统，图中虚线 A、B 与 D 将电厂循环、碳捕集系统、太阳能集热场和有机朗肯循环相连。其工作原理为：利用太阳能有机朗肯循环的冷凝热或汽轮机抽汽的方式为再沸器提供热量，用以捕捉烟气中 CO_2；同时太阳能有机朗肯循环可以发电，实现了太阳能的梯级利用[4]。太阳能集热温度 330 ℃，有机工质选用甲苯，蒸发温度为 300 ℃，冷凝温度 152 ℃，ORC 循环热效率 15.4%。

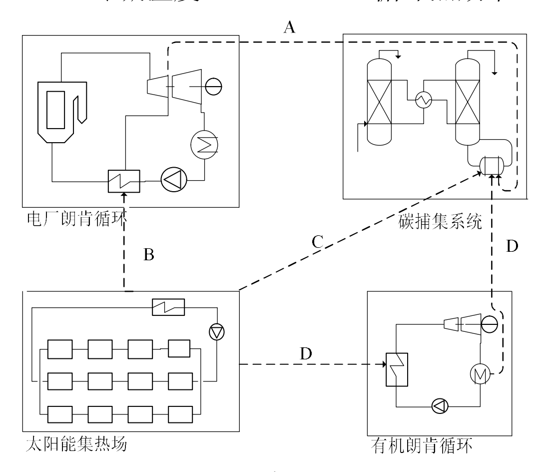


图 1 四种系统对应简图

Fig.1 Schematic diagram of four cases

2 技术性对比

技术性分析是以 300 MW 的燃煤电厂为基础，电厂烟气排放量 256.4 ton/h。电厂添加碳捕集系统后，采用汽轮机抽汽对再沸器提供热量，电厂附属功率消耗（风机等）为 17.05 MW，若碳捕集率为 90%时，抽汽带来的功率损失为 37.9 MW，碳捕集系统附属功率消耗 17.2 MW[1]。系统 2 利用集热场加热蒸汽代替电厂循环抽汽加热回热器，300 MW 燃煤电厂系统附属消耗 25 MW[5]。所有集热场采用槽式太阳能集热器。

选取我国西部一个太阳能资源丰富的地区的气候条件做基准，相应的月平均温度 T_a、月平均阳光时间 t_s 和月平均直射辐射 I, 如表 1 所示。技术分析与对比基于以下假设：

（1）碳捕捉带来的功率损失与 CO_2 捕集率成线性关系[6]；（2）碳减排当量计算：按 284.7 g/kWh 计算太阳能所发电量对应的碳减排量；（3）所有系统没有考虑蓄热装置，当太阳能直射辐射大于等于 200 W/m^2，启用太阳能集热器装置；当直射辐射小于 200 W/m^2，关闭太阳能集热器，开启汽轮机抽汽[3]。

当设计 CO_2 捕集系统的捕集率为 50%时，根据以上条件设计太阳能集热场（系统 2 除外）。太阳能集热场的设计以全年平均值来计算。各个系统的集热场面积 S、年总发电量 E_T 和年总减排量 Q_C，如表 2 所示：

表 1 月平均温度 T_a、月平均阳光时间 t_s 和月平均直射辐射 I

Table1 Monthly mean ambient temperature, sunshine hours, and DNI of typical city

Month	t_s/h•day^{-1}	I/kWh•m^{-2}day^{-1}	T_a/^{O}C
1	7.8	3.7	1.1
2	8.3	3.8	4.4
3	8.8	3.6	6.7
4	9.7	3.9	11.1
5	10.6	5.2	15.0
6	11.0	6.2	18.7
7	10.2	4.6	18.0
8	9.9	4.3	16.7
9	9.1	3.4	15.5
10	8.8	4.5	12.6
11	8.0	4.4	7.5
12	7.8	3.3	2.7

表 2 各系统的集热场面积 S、年总发电量 E_T和年总减排量 Q_C

Table2 solar fields, yearly electricity production and yearly emission reduction of four systems

名称	S/km^2	E_T/GWh·year^{-1}	Q_C/ton·year^{-1}
系统 1	0	2022	1.031×10^6
系统 2	0.120	2242	2.337×10^4
系统 3	0.396	2095	1.008×10^6
系统 4	0.450	2153	1.014×10^6

由表 2 分析对比得出：（1）集热场面积，系统 3<系统 4。由于太阳能有机朗肯循环的冷凝热用于再沸器热耗，同时进行太阳能热发电，相对于太阳能集热器全用于再沸器耗能所需热量更大，故系统 4 的集热面积比系统 3 的面积大 13.6%。

（2）年总发电量比较序列：系统 1<系统 3<系统 4<系统 2。系统 2 作为间接减排方式没有碳捕集系统，

不需要汽轮机抽汽引起功率损失，在集热器运行期间太阳能可以增加系统功率，故全年总发电量最大，约为 2242GWh。在含有碳捕集的其他三个系统中，系统 4 中太阳能有机朗肯循环热发电可以带来额外发电量，故系统 4 的全年总发电量比系统 3 的高 2.8%。此外，由于没有太阳能的辅助，系统 1 全年进行汽轮机抽汽供给再沸器热耗，引起大量功率损失，所以系统 1 的全年总发电量最小，为 2022GWh。

（3）年总减排量比较序列：系统 2<系统 3<系统 4<系统 1。系统 2 没有碳捕集设备，属于间接减排方式，所以全年总减排量最低，为 2.337×10^4 ton。在含有碳捕集的其他三个系统中，系统 4 中太阳能有机朗肯循环热发电可以折算碳减排量，所以系统 4 的全年碳减排量比系统 3 的高 0.6%。太阳能辅助采用全年平均值来设计集热场，导致部分集热器运行时间里碳捕集率低于 50%，太阳能热发电折算的减排量又很小，而系统 1 采用汽轮机抽汽可以稳定捕捉烟气中的 CO_2，所以系统 1 的减排量最大，约为 1.031×10^6 ton。

3 经济性对比

经济性对比采用均化发电成本（LCOE）和碳移除成本(COR)来分析计算。LCOE 和 COR 的公式如下：

$$LCOE=\frac{\sum(N_t+O_t+F_t+M_t+D_t)}{\sum(E_t\bullet(1+r)^{-t})} \tag{1}$$

$$COR=\frac{(LCOE_{cap}-LCOE_{ref})\bullet E_t}{C_{CO2,t}} \tag{2}$$

以上公式中，N_t，为第 t 年的系统投资；O_t，为第 t 年的运行维护成本；F_t，为第 t 年的燃料成本；M_t，为第 t 年的 MEA 损失的成本；D_t, 为系统残值 0；$(1+r)^{-t}$，为第 t 年的折现因子；E_t, 为第 t 年的系统发电量；$C_{CO2,t}$，为第 t 年碳减排量。

经济性对比还需以下假设：（1）捕捉 CO_2 的运输成本和储存成本没有考虑；（2）整个运行期间没有考虑任何碳减排补贴等政策优惠；（3）每年在 12 月份各个系统进行维护整修, 则全年运行时间 8016 小时。四个系统的经济性参数如表 3 所示。

由于四个系统都是辅助燃煤电厂碳减排系统，经济性对比主要集中在三个方面：第一，碳捕集系统的成本变化；第二，太阳能集热场成本变化；第三，有机朗肯循环设备的成本变化。

在各系统的经济性参数保持不变的情况下，当碳捕集设备投资的价格分别增加或减少 15%时，各系统的 LCOE 和 COR 的变化如图 2 所示。由于系统 2 没有含有碳捕集设备，其 LCOE 和 COR 保持不变，分别为 0.407CNY/kW 时和 1703.38 CNY/ton。当设备价格增加或减少时，其他三个系统的 LCOE 和 COR 相应的分别增加或减少。例如碳捕集设备价格增加 15%，系统 4 的 LCOE 则增加了 2.46%，达到了 0.604 CNY/kW 时；碳捕集设备价格减少 10%，系统 4 的 COR 则减少了 5.75%，达到了 356.59 CNY/ton。四个系统在此变化区间内均化发电成本和碳移除成本都没有交叉点。

表 3 系统经济性比较所需参数

Table3 Parameters of four cases for economical analysis

经济参数	数值	经济参数	数值
T/Year	20	T_h/h	8016
T_c/Year	2	Q/%	5
r/%	6	B/%	5
P_p/CNY·kW^{-1}	8396.64	h_m/kg·ton^{-1}	1.6
P_a/CNY	1.27×10^9	P_m/CNY·ton^{-1}	6.11
P_s/CNY·m^{-2}	1165.5[4]	h_c/ton·h^{-1}	98
P_o/CNY·kW^{-1}	15750	P_c/CNY·ton^{-1}	598.5

注：T—项目周期；T_c—项目建设时间；T_h—全年运行时间；B—建设成本；Q—运行维护成本；r—利率；P_p—电厂成本；P_a—捕集装置成本；P_s—集热场成本；P_o—ORC 设备成本；P_m—MEA 成本；P_c—煤价格；h_m—MEA 耗损；h_c—煤消耗。

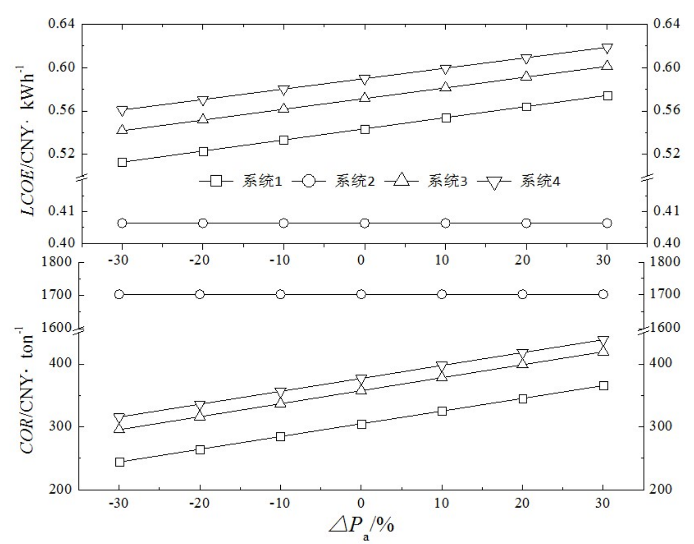


图 2 碳捕集设备价格变动时各系统的 LCOE 与 COR

Fig.2 Variation of LCOE and COR with the cost of the Amine plant

在各系统的经济性参数保持不变的情况下，当集热场的价格变动时，各系统的 LCOE 与 COR 变化如图 3 所示，可以发现：由于系统 1 不含有太阳能集热场，其 LCOE 和 COR 保持不变，分别为 0.544 CNY/kWh 和 304.93 CNY/ton。当集热场成本低于 606.7 CNY/m^2，系统 3 的 LCOE 将低于系统 1 的成本，太阳能辅助电厂碳捕集系统（系统 3）此时将比常规电厂汽轮机抽汽式碳捕集系统（系统 1）更具有优势。例如

集热场价格为 500 CNY/m^{2}时，系统 3 的均化发电成本为 0.540 CNY/kWh，这比系统 1 的 LCOE 低了 0.74%。然而，四个系统的 COR 在此区间没有交叉点。由于系统 2 的全年碳减排量远低于其他三个系统的减排量，导致其 COR 远大于其他三个系统的 COR。例如集热场价格为 1100 CNY/m^{2}时，系统 2 的 COR 为 1631.99 CNY/ton，约为系统 1 对应 COR 的 5.4 倍。

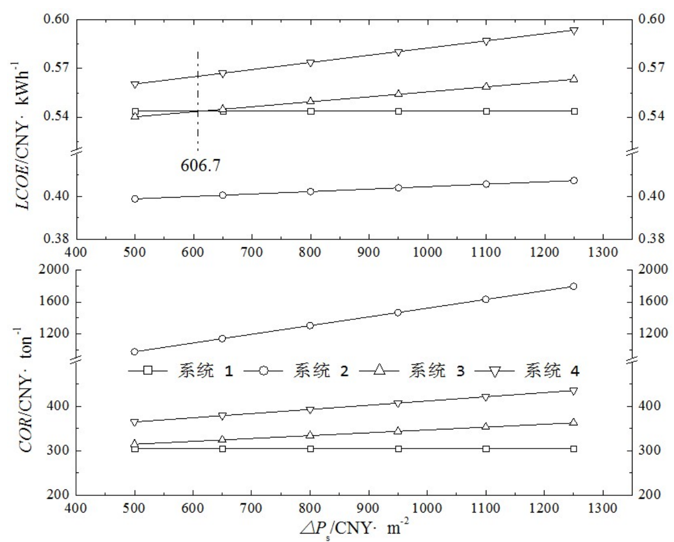


图 3 太阳能集热场价格变动时各系统的 LCOE 与 COR

Fig.3 Variation of LCOE and COR with the solar field cost

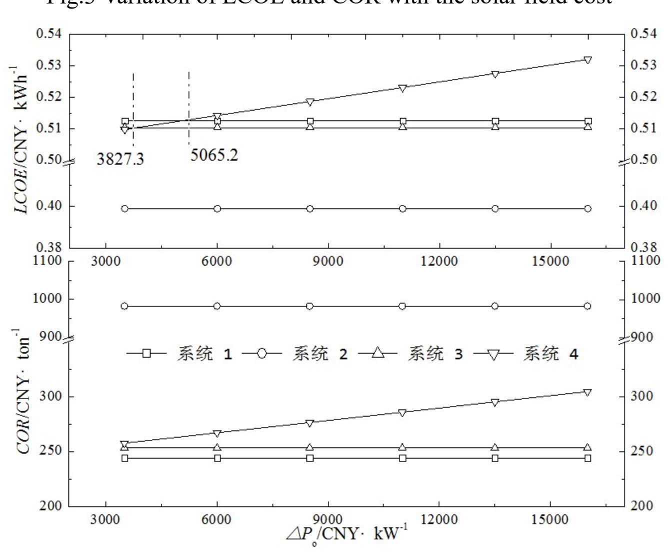


图 4 ORC 设备价格变动时各系统的 LCOE 与 COR

Fig.4 Variation of LCOE and COR with the ORC cost

当碳捕集设备的价格降低到原价的 70%，太阳能集热场的价格降到 504 CNY/m^2，其他经济数据保持不变的时候，关于有机朗肯循环设备价格变动引起的变化，如图 4 所示。由于碳捕集设备和集热场成本都已降低，此时系统 3 的 LCOE 已经低于系统 1 的 LCOE。由于其他系统（除系统 4 外）不含有 ORC 设备，所以这些系统的 LCOE 和 COR 保持不变。当 ORC 设备降低到 5065.2 CNY/kW，系统 4 的 LCOE 将和系统 1 的 LCOE 一样。当 ORC 设备价格继续降到低于 3827.3 CNY/kW，系统 4 的 LCOE 要比系统 3 的 LCOE 的低。四个系统在此变化区间内 COR 都没有交叉点。

4 结论

从系统全年总发电量和总碳减排量出发，对于太阳能辅助燃煤电厂碳减排的四种典型构型进行性能考察，可以发现当太阳能热利用辅助方式的梯级利用越合理，系统越具有优势，具体体现为经济性与技术性能的平衡。系统 4 为太阳能驱动 ORC 辅助燃煤电厂碳捕捉，利用太阳能发电的同时又通过冷凝热供给再沸器热量，实现了太阳能的梯级利用，在全年总发电量和总碳减排量方面处于比较序列里的第二位。需要说明的是，对于梯级利用复杂的太阳能辅助方式，其 LCOE 和 COR 相对较高，只有随着技术进步和成本的下降，此类辅助方式才可能在经济性上具有优势。例如，当碳捕集设备的价格降低到原价的 70%，太阳能集热场的成本降到 504 CNY/m^2，ORC 设备低于 5065.2 CNY/kW，系统 4 的 LCOE 会低于系统 1 的 LCOE。

参考文献

[1] Khalilpour R, Abbas A. HEN Optimization for Efficient Retrofitting of Coal-fired Power Plants with Post-combustion Carbon Capture [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5: 189–199

[2] Li HL, Yan JY., Campana P.E. Feasibility of Fntegrating Solar Energy into a Power Plant with Amine-based Chemical Absorption for CO_2 Capture [J]. International Journal of Greenhouse gas control. 2012, 9: 272-280

[3] Mokhtar M, Ali MT, Khalilpour R, et al. Solar-assisted Post-combustion Carbon Capture Feasibility Study [J]. Applied Energy, 2012, 92: 668-676

[4] 赵力，谭雨亭. 太阳能有机朗肯循环辅助燃煤发电进行碳捕集的系统装置：中国, CN201310277530[P]. 2013-07-04 ZHAO Li., TAN Yuting. System device of integrating solar Organic Rankine into a coal-fired power plant: China, CN201310277530[P]. 2013-07-04

[5] Bakos GC, Tsechelidou C. Solar Aided Power Generation of a 300 MW Lignite Fred Power Plant Combined with Line-focus Parabolic Trough Collectors Feld [J]. Renewable Energy, 2013, 60: 540-547

[6] Kazuya G, Katsunori Y, Takayuki H. A Review of Efficiency Penalty in a Coal-fired Power Plant with Post-combustion CO_2 Capture [J]. Applied Energy, 2013, 111:710–720